

## **EMULADOR PROGRAMABLE DE PILAS DE HIDRÓGENO PARA APLICACIÓN EN SISTEMAS HÍBRIDOS BASADOS EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS**

C. Mancini<sup>1</sup>, J. Moré<sup>2</sup>, P. Puleston<sup>3</sup>, F. Mosquera<sup>4</sup>.  
LEICI – Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control  
y Procesamiento de Señales (FI UNLP - CONICET)

*Recibido 05/08/16, 02/10/16*

**RESUMEN:** Se desarrolló un prototipo de emulador de celdas de combustible (FC). El trabajo está enmarcado en la construcción de un sistema de generación híbrido (SGH). El profundo estudio de los sistemas de FCs en el marco de los SGH permitió la modelización, simulación y puesta en práctica del diseño propuesto. Se utilizó un convertidor reductor como soporte físico del emulador, cuyos algoritmos de control se aplicaron mediante un controlador digital de señales. Se implementaron dos modelos diferentes de característica corriente-tensión. El primer caso, de parámetros fijos y que solo contempla la variación de tensión en función de la corriente entregada; el segundo caso, con ajuste variable de algunos de estos parámetros. Se presentan pruebas experimentales que permitieron validar el adecuado funcionamiento del emulador en forma independiente y como parte del SGH. El dispositivo resultante pretende asistir en el desarrollo de sistemas de generación alternativos y limpios al ofrecer un dispositivo barato, flexible y simple.

**Palabras clave:** Pilas de combustible, hidrógeno, emulador, convertidor de potencia, controlador digital de señales.

### **INTRODUCCION**

Actualmente, la problemática del abastecimiento de energía eléctrica es objeto de gran discusión a nivel mundial, regional y local. Una de las principales preocupaciones está dirigida hacia el impacto ambiental y el incipiente agotamiento de los combustibles fósiles, utilizados para generar gran parte de la energía disponible. Por ello, se ha motivado el desarrollo y utilización de fuentes de generación alternativas, renovables y limpias. Entre los combustibles no convencionales más prometedores, se encuentra el hidrógeno. Si bien su obtención debe realizarse a partir de síntesis química, se ha demostrado que es posible producirlo en forma eficiente con electrolizadores, mediante energía proveniente de fuentes alternativas renovables.

Existen varios procesos de generación de energía usando hidrógeno. La combustión directa es una opción para obtener calor. Sin embargo, si se pretende obtener energía eléctrica, un proceso muy eficiente y limpio se realiza mediante las llamadas celdas de combustible (Larminie y Dicks, 2003). Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que permiten obtener energía eléctrica a partir de la reacción química controlada entre un combustible un oxidante. Entre sus beneficios se encuentra la alta eficiencia de conversión y las escasas emisiones contaminantes, que en el caso del hidrógeno son idealmente nulas debido a que el producto de reacción es agua.

Las celdas de combustible se disponen en pilas de arreglos en serie para aumentar la tensión entregada y vienen acompañadas de subsistemas auxiliares encargados de controlar los procesos físico-químicos. Este conjunto de componentes son llamados sistemas de pilas de combustible (SPC). La operación de las PCs se ve limitada por la necesidad de estar integradas dentro de un sistema y la disponibilidad del combustible. Para solucionar estos problemas, se integran los SPC dentro de sistemas de generación híbridos (SGH) (J. J. Moré et al., 2015).

<sup>1</sup> Ingeniero en Electrónica, Facultad de Ingeniería - UNLP

<sup>2</sup> Prof. Adjunto UNLP - Investigador Asistente CONICET

<sup>3</sup> Prof. Titular UNLP - Investigador Independiente CONICET

<sup>4</sup> Estudiante Ingeniería en Electrónica, Facultad de Ingeniería - UNLP

El emulador propuesto permite evitar el costo de adquirir un SPC, el hidrógeno combustible y por consiguiente no enfrentarse a las complicaciones requeridas para su almacenamiento. Este diseño se encuentra en el contexto del proyecto de la concepción de un SGH (Figura 1) y se construyó en base a un convertidor elevador DC-DC, desarrollado originalmente como etapa de potencia para dicho SGH (Caravelli e Irusta, 2011). El trabajo contempló el estudio del sistema mediante simulaciones, la programación de los algoritmos y el uso de un entorno de desarrollo y los ajustes necesarios para adaptar el *hardware* utilizado. El emulador cuenta con las ventajas de haber sido diseñado utilizando dos modelos, ofreciendo flexibilidad para controlar los parámetros que modifican su característica, y se utilizaron componentes de bajo costo y algoritmos de control de implementación sencilla.

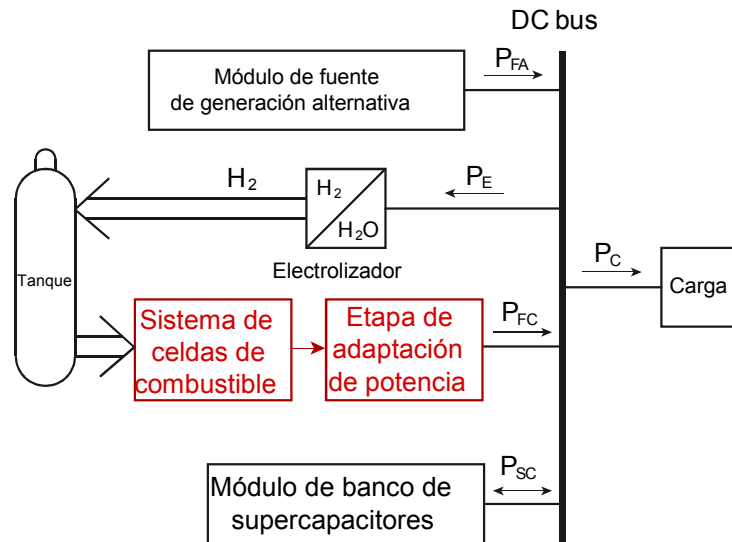


Figura 1: Diagrama en bloques de sistema híbrido

En la Figura 1 se muestra el modelo de sistema de generación híbrido sobre el cuál se trabajó. En el esquema se aprecian dos sistemas de generación, siendo el sistema de pilas de combustible uno de ellos. Se ha incorporado un electrolizador que se encarga de obtener hidrógeno a partir del excedente de potencia entregado por el módulo de fuente de generación adicional. Además, se incorpora un módulo de supercapacitores para mejorar el rendimiento dinámico del sistema. Todos los subsistemas entregan o extraen energía de una *línea de tensión eléctrica continua* (DC Bus). Aparecen representados los flujos de potencia siendo:  $P_{FA}$  potencia entregada por la fuente alternativa;  $P_E$  potencia consumida por el electrolizador;  $P_{FC}$  potencia entregada por el sistema de pilas de combustible;  $P_{SC}$  potencia intercambiada por el módulo de capacitores;  $P_C$  potencia entregada a la carga.

El prototipo fue desarrollado bajo la premisa de que su simplicidad permita integrarlo en cualquier espacio de trabajo. Emplea un único sistema de potencia en vez de dos, como se presenta en (S. Sirisukprasert y T. Saengsuwan, 2009), lo cual implica una reducción en la complejidad del control a implementar. Por otra parte, la topología del convertidor de potencia utiliza un único inductor, a diferencia del trabajo presentado en (C. A. Ramos-Paja et al., 2011) que utiliza dos inductores incrementando consecuentemente el número de estados, el costo y la complejidad del control.

## PILAS DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible están constituidas básicamente por dos partes fundamentales: el electrolito y los electrodos. En el caso de las pilas de hidrógeno, la reacción llevada a cabo es  $2H + O_2 \rightarrow 2H_2O$ . Los materiales que componen la celda influyen en el comportamiento de los procesos aparejados a la reacción mencionada, así como su diseño físico. Dentro de los distintos tipos de PCs, este trabajo estudia especialmente las de membrana de intercambio de protones (PEM) alimentado por hidrógeno puro.

En la Figura 2 se muestra un típico SPC, del cual varios de sus subsistemas han sido considerados en uno de los modelos del emulador. Los principales subsistemas son:

- Suministro de combustible: Proporciona combustible con la pureza y presión adecuada al ánodo.
- Suministro de aire: Proporciona aire a la presión adecuada. Incluye compresores y filtros.
- Control de temperatura: Refrigerera el sistema ante incrementos de temperatura.
- Humidificador: Brinda la humedad apropiada a los gases de reacción mejorando desempeño.
- Separadores de humedad: Evacúa el agua generada por la pila y proporciona un indicador de energía eléctrica producida.
- Acondicionamiento de potencia: Regula el nivel de tensión eléctrica de la pila.

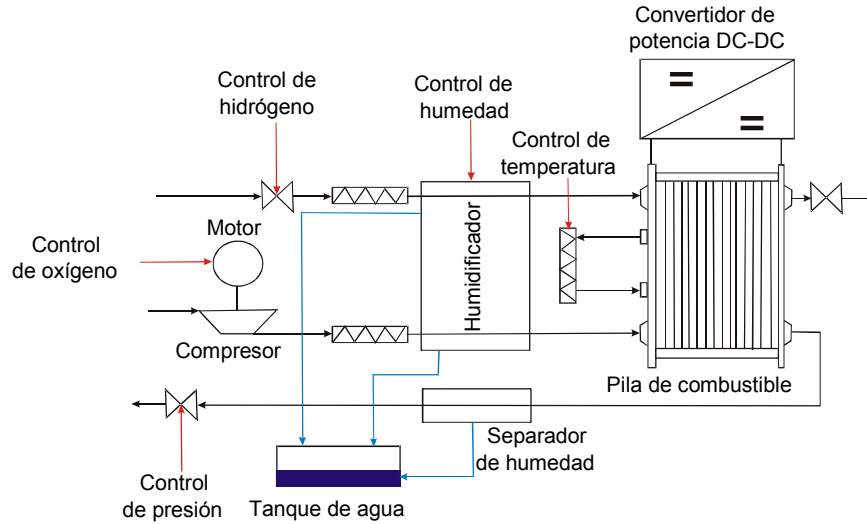


Figura 2: Sistema de celdas de combustible

#### Modelo eléctrico de celdas de combustible

La característica eléctrica que presentan las celdas se describe principalmente mediante tres procesos físico-químicos y devuelve la curva mostrada en la Figura 3. Se puede apreciar que la tendencia de la tensión es decreciente a medida que la carga aumenta y por eso se requiere regular la tensión entregada.

Tal como se puede notar en la Figura 3 se han distinguido tres regiones en las que se dan ciertas caídas de tensión. En la literatura se suelen representar esos efectos mediante términos de una misma expresión. Esto se traduce en (1).

$$U_{fc} = E - U_{act} - U_{ohm} - U_{conc} \quad (1)$$

A partir de los modelos que explican los fenómenos que se producen en la pila se obtiene la expresión matemática que se utilizó en los algoritmos de control. Los efectos se dividen en regiones y se pueden estudiar separadamente. Debido a que se presenta una disminución de la tensión a mayor carga se considera que las variaciones causadas por pérdidas que se numeran a continuación con las expresiones que las describen con detalle en función de la densidad de corriente  $i$ :

- **Tensión de circuito abierto:** Representa la máxima tensión que una celda puede entregar y depende de la presión aplicada en los electrodos y la temperatura de la celda:

$$E = E^0 + \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}}$$

- **Caída de tensión por activación:** Operando a baja densidad de corriente se manifiesta el requerimiento de energía inicial para que las reacciones químicas comiencen a producirse:

$$U_{act} = \frac{RT_{fc}}{2\alpha F} \ln \frac{i - i_n}{i_0}$$

- **Caída de tensión por resistencia eléctrica:** Su causa se debe a la resistencia tanto de los electrodos al paso de los electrones como la del electrolito frente al paso de iones y se describe por la ley de ohm, aunque su resistencia depende de otros parámetros:

$$U_{ohm} = ir$$

- **Caída de tensión por concentración:** En la medida que se demanda mayor corriente en los electrodos se producen variaciones de presión en su superficie debido a cambios en la concentración de los reactivos suministrados:

$$U_{conc} = me^{ni}$$

Donde  $E^0$  es tensión reversible de circuito abierto,  $R$  la constante universal de los gases,  $F$  la constante de Faraday,  $p_{H_2}$ ,  $p_{O_2}$  y  $p_{H_2O}$  las presiones parciales de hidrógeno, oxígeno y vapor respectivamente,  $\alpha$  coeficiente de transferencia de carga,  $i_n$  corriente de cruce,  $i_0$  densidad de intercambio de corriente,  $r$  la resistencia por área y  $m$  y  $n$  son constantes de ajuste.

En el trabajo (M. Ordonez et al., 2005) no se contempla la característica funcionando en la región de concentración mientras que el modelo de tensión utilizado contempla todas las regiones de funcionamiento.

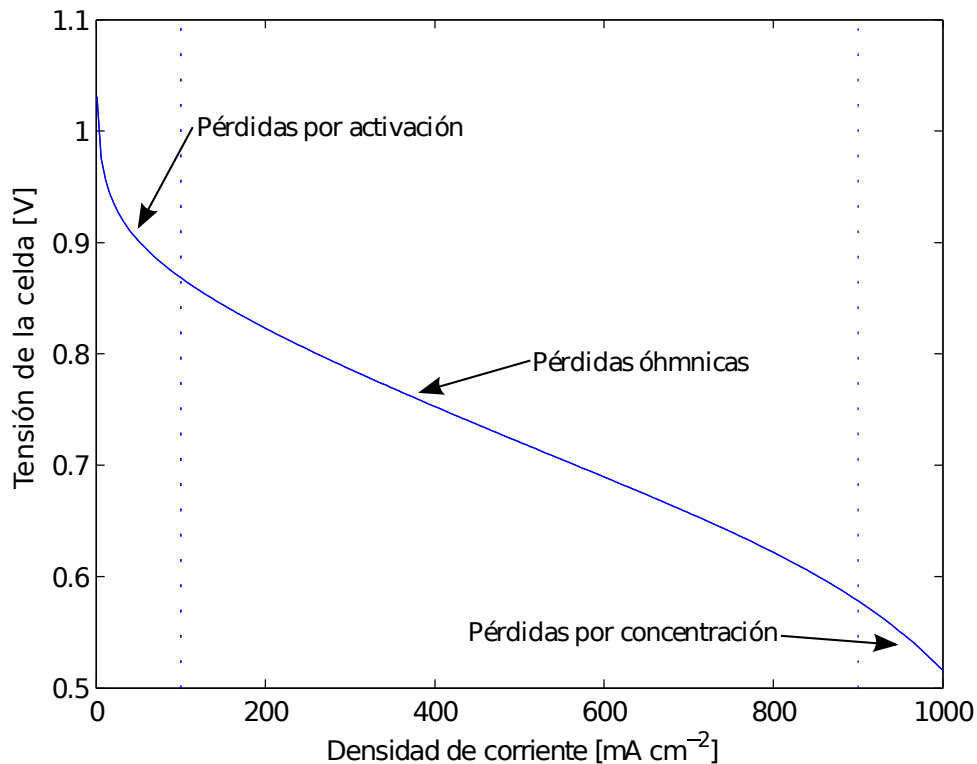


Figura 3: Regiones de funcionamiento de la celda de combustible.

#### Modelos propuestos

Considerando que las celdas que componen la pila son idénticas se puede sumar la contribución de la tensión de cada uno,

$$U_{st} = n_{fc} U_{fc} \quad (2)$$

Siendo  $n_{fc}$  el número de celdas.

Además, la densidad de corriente se relaciona con la corriente entregada mediante la siguiente expresión,

$$I = i A_{fc} \quad (3)$$

### Modelo fijo

Uno de los modelos se realizó en base al ajuste de medidas realizadas sobre la pila comercial PEM Ballard NEXA operando a 70°C y se implementó directamente una función que devuelve la característica de la pila para las condiciones dadas (Larminie y Dicks, 2003). La expresión siguiente representa la tensión de una única celda en función de la densidad de corriente,

$$U_{fc}(i) = E - \frac{RT_{fc}}{2\alpha F} \ln \frac{i + i_n}{i_0} - ir - me^{ni}$$

Sin embargo, la función implementada en el emulador está dada en términos de la corriente de carga y la tensión de la pila de celdas. Haciendo el área efectiva ( $A_{fc}$ ) un parámetro de ajustes tomando en consideración la contribución de todas las celdas se tiene la expresión (4).

$$U_{st}(I) = \left( E_{oc} - \frac{RT_{fc}}{2\alpha F} \ln \frac{I + I_n}{A_{fc}} - \frac{I r}{A_{fc}} - m e^{\frac{n}{A_{fc}} I} \right) n_{fc} \quad (4)$$

### Modelo paramétrico

Con el fin de obtener un modelo con mayor flexibilidad se propuso hacer accesibles algunas de las variables del modelo de tensión. Para ello se usó el análisis de (J. T. Pukrushpan et al. 2014). Este desarrollo permite ampliar las características del emulador considerando las variables físicas de los subsistemas.

Los parámetros de control utilizados en el modelo de tensión ajustable fueron las presiones de los electrodos, la humedad relativa y la temperatura a diferencia de los trabajos (G. Marsala et al, 2009) y (C. A. Ramos-Paja et al., 2011) que utilizan las proporciones de reactivo consumido en el cátodo (oxígeno en el caso estudiado de pilas de hidrógeno).

Los términos de (1) que caracterizan las pérdidas de este modelo varían ligeramente respecto al utilizado anteriormente, aunque el comportamiento cualitativo refleja la misma tendencia.

$$U_{st}(I) = \left( E - \left( u_o + u_a \left( 1 - e^{-\frac{c_1 I}{A_{fc}}} \right) \right) - \frac{I R_{ohm}}{A_{fc}} - \frac{I}{A_{fc}} \left( \frac{c_2 I}{A_{fc} i_{max}} \right)^{c_3} \right) n_{fc} \quad (5)$$

La expresión anterior está definida de forma que las variables dependen de los diferentes parámetros físicos que entran en juego en el sistema de la pila y se han obtenido de ajustes paramétricos asistidos por software, realizados sobre mediciones tomadas de una pila comercial.

- $E = 1,4824 - 8,5 \times 10^{-4} + 4,308 \times 10^{-5} T_{fc} \left( \ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right) V$
- $u_o = 0,5324 - 8,5 \times 10^{-4} V$
- $u_a =$   
 $-1,618 \times 10^{-2} (T_{fc} \times 10^{-3} + 1) \left( \frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat} \right)^2 + (1,8 \times 10^{-4} T_{fc} - 0,166) \left( \frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat} \right) + (-5,8 \times 10^{-4} T_{fc} + 0,5736) V$
- $c_1 = 10 \frac{cm^2}{A}$
- $R_{ohm} = 0,18199 e^{350 \left( \frac{1}{T_{fc}} - \frac{1}{303} \right)} \Omega$
- $c_2 = (8,66 \times 10^{-5} - 0,068) \left( \frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat} \right) + (1,6 \times 10^{-4} + 0,54) cm^2$
- $i_{max} = 2,2 A$
- $c_3 = 2$

Los parámetros modificables son:  $T_{fc}$  la temperatura de la celda,  $p_{H_2}$  la presión de oxígeno en el cátodo,  $p_{O_2}$  la presión de hidrógeno en el ánodo y  $p_{sat}$  la presión de saturación de vapor. Se calcula mediante la expresión  $p_{sat} = 1,456 \times 10^{-7} e^{0,04203T_{fc}}$  que depende de la temperatura de la celda  $T_{fc}$ . Por último  $u_0, u_a, c_1, c_2, c_3, i_{max}$  representan variables de ajuste.

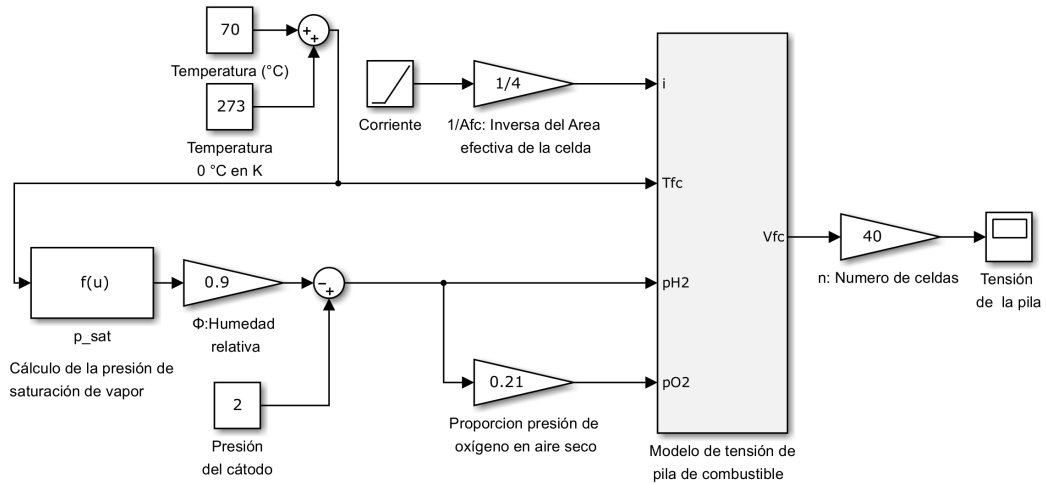


Figura 4: Diagrama esquemático del modelo de tensión de la celda parametrizado

El modelo paramétrico requirió cierta configuración de sus variables de entrada para que la expresión describa un modelo estático y para ello se definió al sistema según la Figura 4. La humedad relativa se fija a un valor que permita un buen desempeño y evite que se deposite agua líquida en el cátodo ante alguna variación. La presión de ánodo se fija de modo que sea igual a la presión de cátodo sin considerar la presión ejercida por el vapor presente.

## DISEÑO DEL EMULADOR

### Convertidor de potencia

Para el diseño del emulador se utilizó el circuito de la Figura 5 que representa la configuración de un convertidor conmutado reductor, siendo  $V_{cc}$  la entrada de tensión continua que alimenta el emulador. Los elementos  $R_i$  y  $C_i$  corresponden a componentes incluidos en el proyecto del convertidor inicial que se adoptó para construir el emulador.  $Q_1$  y  $Q_2$  representan los transistores de potencia, ambos con diodos paralelos que permiten que la corriente sea bidireccional y evitando que el sistema entre en *modo de conducción discontinua*. Las señales  $u_c$  y su complementaria controlan la apertura y cierre de los transistores. Finalmente se encuentra el inductor y capacitor de filtro propios del convertidor reductor. Se ha incluido una resistencia  $R_o$  a la salida para evitar que el convertidor quede sin carga.

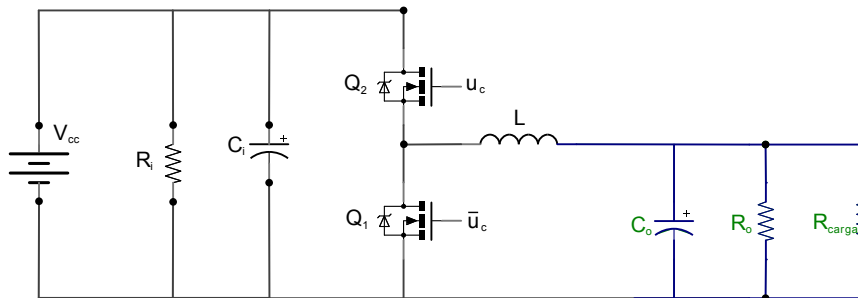


Figura 5: Esquemático del reductor a partir de modificar el circuito del elevador.

### Control

El controlador utilizado pretendió simplificar el sistema para resultar de sencilla implementación. Por ello se decidió utilizar un PI (controlador Proporcional-Integral), de forma que la tensión del convertidor siga la referencia de la expresión del modelo de tensión de la PC y brindando suficiente velocidad de respuesta para hacer ajustes posteriores aprovechando el tiempo de procesamiento

excedente. La señal de control obtenida del controlador lineal se usa de referencia para el modulador de ancho de pulso (PWM) del convertidor conmutado.

Considerando que el convertidor de potencia es un sistema de estructura variable se eligió trabajar sobre un modelo promediado del convertidor reductor. Para ello se representó al sistema del convertidor en el espacio de estados, cuyas variables son la corriente del inductor ( $I_L(s)$ ) y la tensión de que entrega el convertidor ( $U_o(s)$ ).

La aproximación consistió en obtener las funciones de transferencia de salida respecto a la variación del ciclo de trabajo de la señal PWM. Para ello se asumió que las variables operan en torno a un punto de trabajo con pequeñas variaciones y luego se promedió el modelo del sistema para obtener el espacio de estados resultante que devolvió las siguientes funciones de transferencia,

$$\frac{\tilde{y}(s)}{\tilde{d}(s)} = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}) - (B_1 - B_2)\langle \mathbf{u} \rangle = \begin{pmatrix} \frac{I_L(s)}{d(s)} \\ \frac{U_o(s)}{d(s)} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Las variables de salida quedan representadas por el vector  $\tilde{\mathbf{y}}(s)$  y  $\tilde{d}(s)$  representa las variaciones del ciclo de trabajo del PWM alrededor de un punto de operación.

Los elementos del espacio de estados se definen a continuación y se contemplan los elementos parásitos que ejercen mayor influencia en la salida y provocan las mayores pérdidas.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{-(r_s(r_c + R_o) + r_c R_o)}{(r_c + R_o)L} & \frac{-1}{\left(1 + \frac{r_c}{R_o}\right)L} \\ \frac{1}{\left(1 + \frac{r_c}{R_o}\right)C} & \frac{-1}{\left(1 + \frac{r_c}{R_o}\right)R_o C} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix}, 0 < t < DT$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, DT < t < T$$

Dónde  $R_o$  es la resistencia de carga,  $L$  y  $C$  la inductancia y capacidad del convertidor,  $r_s$  y  $r_c$  sus correspondientes resistencias serie.

La arquitectura de control seleccionada utilizó las mediciones de tensión de salida y corriente de inductor según el esquema de la Figura 6, dónde se incorporan los modelos de tensión desarrollados. Es necesario adicionar un filtro para la corriente medida debido al rizado propio de la conmutación del convertidor de potencia. La Señal de control  $U_c$  ingresa al módulo PWM del procesador y devuelve las señales que controlan la conmutación de los transistores.

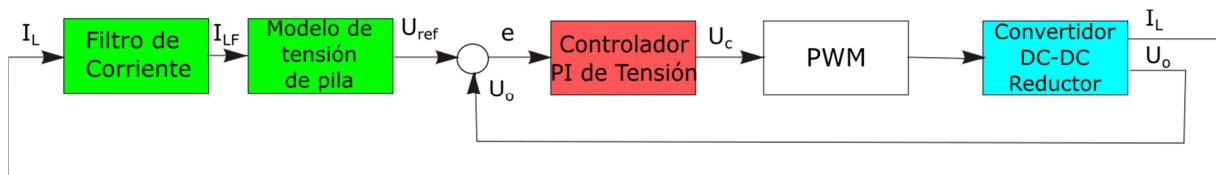


Figura 6: Esquema genera del control

Para obtener la referencia de tensión que aplica el control se calcula de la expresión utilizada en vez de usar tablas de búsqueda aprovechando la máxima resolución del conversor analógico-digital.

#### IV. Resultados experimentales



Se utilizó un controlador digital de señales (DSP) de 32 bits TMS320F28335 como unidad de control y el convertidor DC-DC reductor para las pruebas de laboratorio. El lugar de trabajo fue el Laboratorio de Electrónica Industrial, Control e Instrumentación (LEICI). En los ensayos se obtuvo la información de la polarización y del comportamiento dinámico de los dispositivos terminados.

La Figura 7 muestra el sistema del emulador completo. A la izquierda la placa contiene el circuito del convertidor conmutado y además toda la electrónica necesaria para realizar los disparos de los transistores, los sensores que miden las magnitudes eléctricas y circuitos auxiliares. A la derecha se encuentran, en orden descendente, la plataforma de desarrollo que contiene el DSC, los capacitores, inductor y carga fija del sistema del convertidor reductor.



*Figura 7: Emulador completo*

#### Ensayo del emulador fijo

La característica eléctrica del emulador se aprecia en la Figura 8. En ella se muestra la polarización del emulador utilizando las cargas disponibles en el laboratorio.



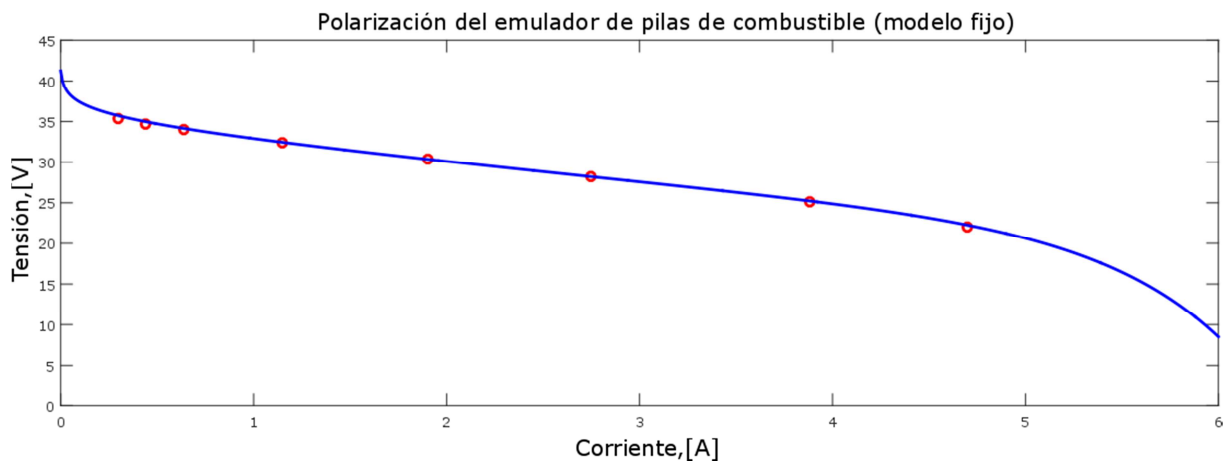


Figura 8: Polarización del emulador (mod. fijo) a diferentes cargas.

#### Ensayo de emulador paramétrico

Al ensayo anterior le siguió la prueba del emulador paramétrico. Las variables se establecieron a 2atm de presión de cátodo y 90°C de temperatura de la celda en los ensayos realizados y los resultados se muestran en la Figura 9.

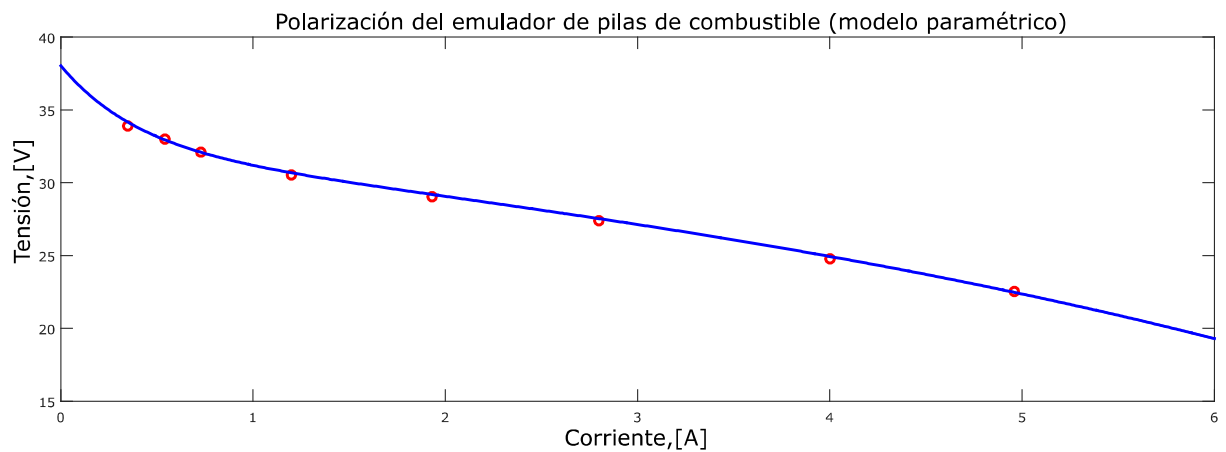


Figura 9: Polarización del emulador (modelo paramétrico) a diferentes cargas.

#### Ensayos dinámicos

Las pruebas de caracterización dinámica describieron un comportamiento estable del sistema funcionando de forma independiente y conectada a la etapa de acondicionamiento de potencia. En los ensayos se probó la reacción del emulador ante cambios de carga típicos como el arranque y perturbación de la carga al duplicar la corriente exigida. Las curvas se muestran en la Figura 10.

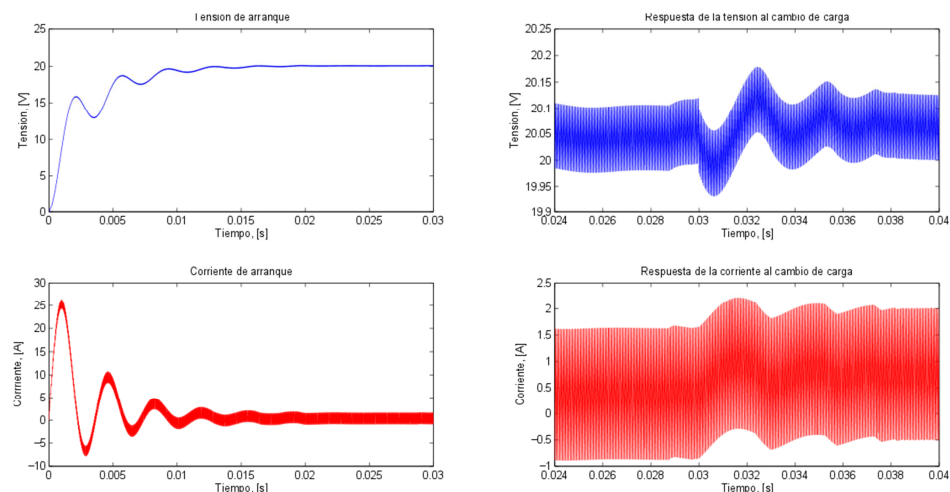
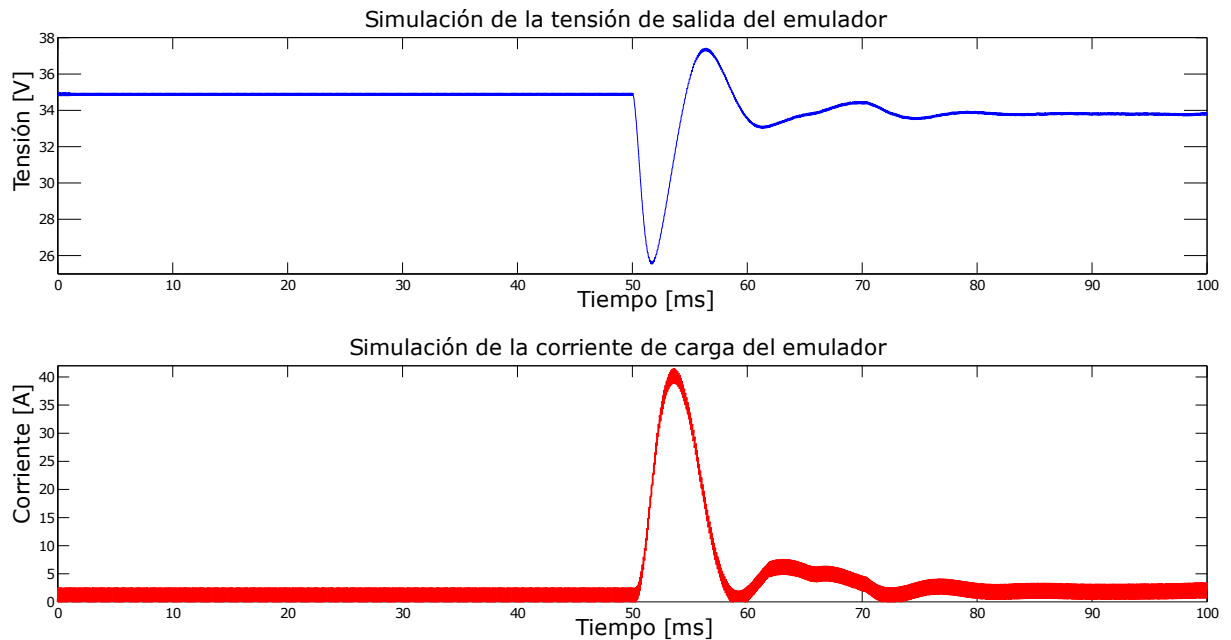
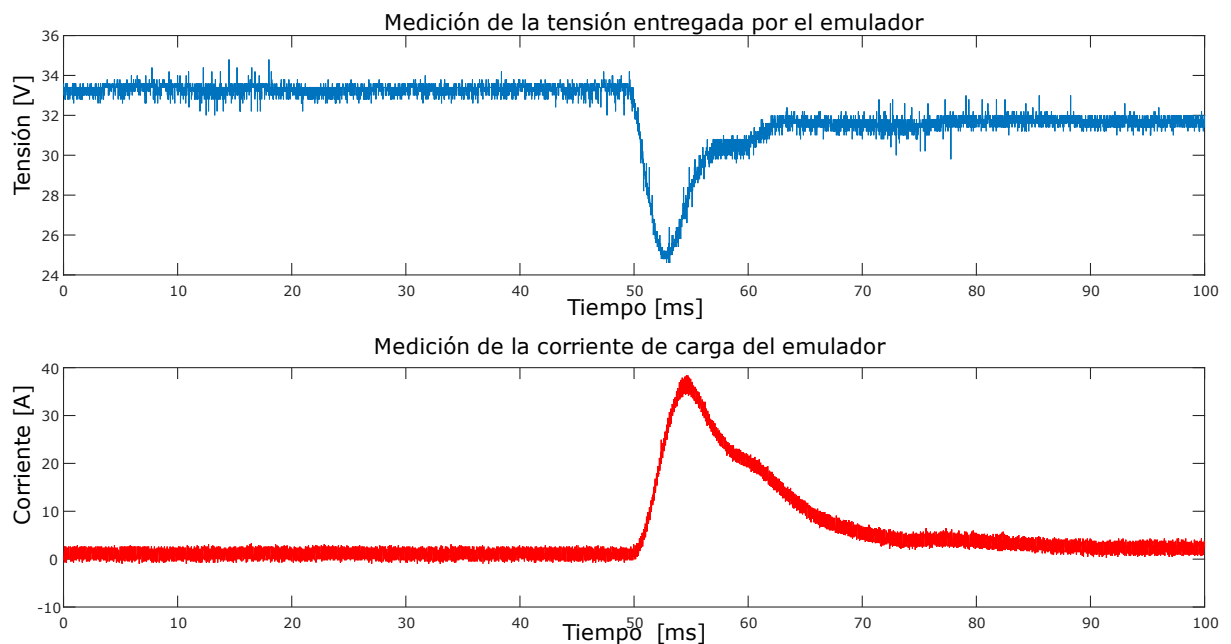


Figura 10: Respuesta del emulador en arranque y perturbación de carga

Además, considerando el marco en que fue desarrollado el proyecto, se realizaron pruebas de integración junto al módulo de acondicionamiento diseñado para adaptar el SPC al SGH. Para comprobar la posibilidad de realizar este procedimiento se realizaron simulaciones que determinaron la configuración del circuito que posibilitaría la interconexión. La estabilidad del funcionamiento del emulador conectado a la etapa de acondicionamiento de potencia en simulación y mediciones respectivamente se determina mediante las curvas mostradas en las Figura 11 y Figura 12.



*Figura 11: Simulación de emulador alimentando etapa de potencia.*



*Figura 12: Ensayo de emulador alimentando etapa de potencia.*

## V. Conclusión

A partir de los resultados obtenidos a lo largo del proyecto se demostró la posibilidad de incluir el emulador junto a otros mecanismos de generación de energía eléctrica ampliando su uso a equipos de investigación como un SGH. De esta forma se elimina la necesidad de contar con una PC real para ensayos eléctricos de laboratorio, la cual resulta muy costosa y reviste una complejidad sustancial en su operación.

Durante su desarrollo se probaron varias formas de implementar los modelos teóricos mediante algoritmos computacionales. Además, se conciliaron los resultados prácticos con los teóricos a través de las simulaciones y los resultados experimentales.

Del análisis de varios trabajos del estado del arte en el tema, surgieron diversas combinaciones de los diferentes subsistemas para optimizar sus características y simplificar el producto final.

Se demostró el buen desempeño del diseño desarrollado para reproducir las características eléctricas mediante los algoritmos programados, tanto para parámetros fijos como variables. Los resultados experimentales obtenidos resultaron ser muy satisfactorios en las pruebas estáticas y dinámicas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quisiéramos agradecer la colaboración de varios de los miembros del Instituto LEICI. Especialmente agradecer a Juan Ignacio Talpone quién colaboró de manera directa asistiendo en el desarrollo del soporte físico del trabajo. Este trabajo fue realizado con el apoyo de la Facultad de Ingeniería-UNLP, el CONICET y la ANPCyT.

## NOMENCLATURA

### Símbolo matemático: Descripción [Unidades SI]

$U_{fc}$ : tensión de celda de combustible[V]	$E^0$ : tensión reversible de circuito abierto [V]
$E$ : tensión de circuito abierto [V]	$R$ : constante universal de los gases [J/ (K mol)]
$U_{act}$ : caída de tensión de activación [V]	$F$ : constante de Faraday[C/mol]
$U_{ohm}$ : caída de tensión óhmica [V]	$\alpha$ : coeficiente de transferencia de carga []
$U_{conc}$ : caída de tensión concentración [V]	$i_n$ : corriente de cruce[A/cm <sup>2</sup> ]
$U_{st}$ : tensión de pila de combustible [V]	$i_0$ : densidad de intercambio de corriente [A/cm <sup>2</sup> ]
$T_{fc}$ : la temperatura de la celda [K]	$m$ : constante de ajuste de modelo fijo [V]
$p_{H_2}$ : presión de oxígeno en cátodo [Pa]*	$u_0$ : constante de ajuste de modelo param. [V]
$p_{O_2}$ : presión de hidrógeno en ánodo[Pa]*	$u_a$ : constante de ajuste de modelo param. [V]
$p_{sat}$ : presión de saturación de vapor [Pa]*	$c_1$ : constante de ajuste de modelo param. [cm <sup>2</sup> /A]
$r$ : resistencia por área [Ω/cm <sup>2</sup> ]	$c_2$ : constante de ajuste de modelo param. [cm <sup>2</sup> ]
$\tilde{y}(s)$ : vector de función de transferencias de variación de variables de salida del convertidor reductor []	$c_3$ : constante de ajuste de modelo param. []
$\tilde{d}(s)$ : función de transferencia de variación del ciclo de trabajo del PWM []	$n_{fc}$ : número de celdas de la pila []
$I_L(s)$ : función de transferencia de corriente de inductor [A]	$A_{fc}$ : área efectiva de la celda [cm <sup>2</sup> ]
$U_o(s)$ : función de transferencia de tensión eléctrica de salida [V]	$R_o$ : resistencia de carga [Ω]
	$L$ : inductancia del inductor del convertidor [H]
	$C$ : capacidad del capacitor de filtro del convertidor [F]
	$r_s$ : resistencia serie del inductor [Ω]
	$r_c$ : resistencia serie del capacitor [Ω]

\*En el trabajo la unidad de presión utilizada fue atmósfera [atm] pero ésta no es una unidad que pertenezca al sistema internacional de unidades, la conversión entre Pascal [Pa] y atm es: 1[atm] = 101325[Pa]

## REFERENCIAS

- Caravelli Emanuel, Irusta Gonzalo M. (2011). Diseño y control de una etapa de potencia para una pila de combustible tipo PEM. Proyecto final de Ingeniería Electrónica, pp. 81-207. Facultad de Ingeniería UNLP.
- Larminie James, Dicks Andrew (2003). Fuel Cell Systems Explained, Second Edition, pp. 1-120. John Wiley & Sons.
- Marsala Giuseppe, Pucci Marcello, Vitale Gianpaolo, Cirrincione Maurizio, Miraoui Abdellatif (2009). A prototype of a fuel cell PEM emulator based on a buck converter. Applied Energy 86, 2192–2203.
- Moré J.J., Puleston P.F., Kunusch C. and Riera J. (2015). Development and Implementation of a Supervisor Strategy and Sliding Mode Control Setup for Fuel Cell-Based Hybrid Generation Systems. IEEE Transactions on Energy Conversion 30, 218 – 225.
- Ordóñez Martin, Iqbal M. Tariq and Quaicoe John E. (2005). Development of a fuel cell emulator based on an experimentally derived model. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005, 1449 – 1452.
- Pukrushpan Jay T., Stefanopoulou Anna G. and Peng Huei (2004). Control of Fuel Cell Power Systems, pp. 1-64. 1st edition. Springer-Verlag London.
- Ramos-Paja Carlos Andrés, Jaramillo-Matta Adolfo Andrés, Pérez-Rojas Efraín Antonio (2011). Design and implementation of a PEM fuel cell emulator for static and dynamic behavior. Dyna, 78, 168, 108-118.
- Sirisukprasert Siriroj and Saengsuwan Trin (2009). A Novel Power Electronics-Based Fuel Cell Emulator (2009). ECTI transactions on electrical eng., electronics, and communications 7, 2.

**ABSTRACT:** A prototype of a fuel cell (FC) emulator was developed. The work is embedded into a larger project of a Hybrid Generation System (HGS) conception. FC systems were studied in order to model, simulate and design the actual emulator. A DC-DC converter was used as the physical frame to build it. Two FC electrical models were implemented. One representing a fixed parameters model and the other providing the ability to adjust FC temperature and electrodes' pressure. A digital signal controller was used to program the algorithms to drive the electronic of the power converter. Several tests were performed whose experimental results validated the functionality of the stand-alone emulator and its integration as a part of the HGS. The resulting device intends to aid the development of alternative and clean energy based systems of generation by offering a cheap, flexible and simple test emulator.

**Keywords:** fuel cells, hydrogen, emulator, power converter, digital signal controller.